

## 12. Polarizacija valovanja

Fizika deli valovanja na vzdolžna (longitudinalna) in prečna (transverzalna). Zvok v plinu ali tekočini je vzdolžno valovanje. Valovni vektor  $\vec{k}$  ter amplituda in faza nihanja popolnoma opišejo gibanje delcev plina ali tekočine v smeri razširjanja vzdolžnega valovanja. V trdni snovi lahko hkrati obstajajo različna mehanska valovanja. Potres sproži v Zemljini skorji dve različni valovanji: hitrejši vzdolžni tlačni val P (angleško: primary/pressure wave) in počasnejši prečni strižni val S (angleško: secondary/shear wave) z različnima valovnima vektorjema  $\vec{k}_P \neq \vec{k}_S$ .

Valovni vektor  $\vec{k}$  ter amplituda in faza nihanja ne zadoščajo za celovit opis prečnega valovanja. Če zasukamo eno od pravokotnih koordinatnih osi v smer valovnega vektorja  $\vec{k}$ , ima prečno valovanje natančno dve med sabo popolnoma neodvisni komponenti, ki nihata v smereh preostalih dveh koordinatnih osi. Opisano lastnost prečnega valovanja imenujemo polarizacija valovanja. Sam izraz polarizacija sicer lahko ima v fiziki tudi povsem drugačen pomen.

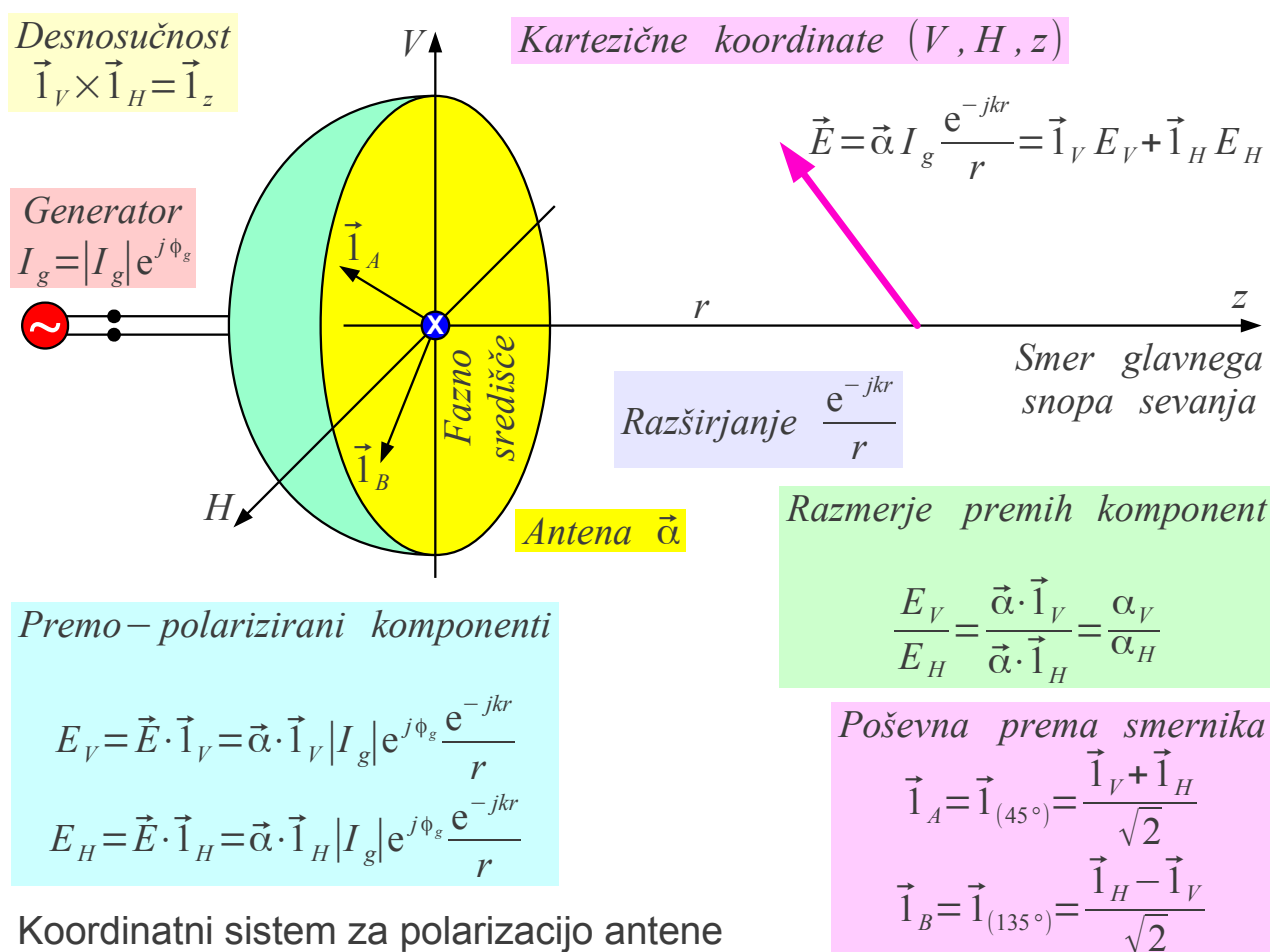
Francoski častnik, inženir in znanstvenik Étienne-Louis Malus je leta 1809 odkril polarizacijo svetlobe. Elektromagnetno valovanje je vedno izključno prečno valovanje. Fizikalni zakoni ne dovoljujejo vzdolžnega elektromagnetnega valovanja. Poljubno elektromagnetno valovanje z določenim valovnim vektorjem  $\vec{k}$  lahko zato razstavimo v natančno dve med sabo pravokotni in ena od druge popolnoma neodvisni komponenti.

Za opis polarizacije valovanja se je nujno najprej dogovoriti za koordinatni sistem. Polarizacijo elektromagnetnega valovanja vedno zapišemo za vektor električnega polja  $\vec{E}$ . Pripadajoče magnetno polje  $\vec{H}$  je nanj vedno pravokotno in tvori s smerjo valovnega vektorja  $\vec{k}$  desnorski koordinatni sistem  $\vec{1}_E \times \vec{1}_H = \vec{1}_k$ . Zato magnetnega polja  $\vec{H}$  pri obravnavi polarizacije elektromagnetnega valovanja ne omenjamo.

Fiziki vežejo koordinatni sistem polarizacije na samo valovanje. V elektrotehniki vežemo koordinatni sistem na anteno ne glede na to, ali se antena uporablja za oddajo ali pa za sprejem valovanja. Zaradi različnih definicij koordinatnih sistemov polarizacije imajo enačbe v elektrotehničnih člankih in knjigah pogosto obrnjene predznake nekaterih veličin glede na fizikalne članke in učbenike.

V elektrotehniki uporabimo desnosučni kartezični koordinatni sistem. Koordinate poimenujemo  $(V, H, z)$ , da poudarimo, da gre za polarizacijo valovanja. Koordinatni sistem  $(V, H, z)$  je sicer popolnoma enak primerno postavljenemu  $(x, y, z)$ . Zaradi obilice podatkov običajno ne navajamo podrobnega polarizacijskega smernega diagrama antene. Polarizacijo antene tedaj preprosto zapišemo samo za maksimum sevanja v osi glavnega snopa.

Izhodišče koordinatnega sistema  $(V, H, z)$  je v faznem središču antene. Os  $z$  je usmerjena v smer glavnega snopa sevanja antene. Pokončna (vertikalna) os  $V$  je usmerjena navzgor oziroma v vesolju v geostacionarni tirnici na sever. Vodoravna (horizontalna) os  $H$  tvori desnosučni koordinatni sistem z ostalima dvema osema. V vesolju v geostacionarni tirnici je os  $H$  usmerjena na vzhod, da kaže os  $z$  v smeri sevanja anten telekomunikacijskega satelita proti Zemlji:



Vektor električnega polja  $\vec{E}$  vedno leži v ravnini  $VH$ , ki je pravokotna na smer širjenja valovanja v smeri osi  $z$ . Sevanje poljubne antene lahko zato razstavimo v premi komponenti  $E_V$  in  $E_H$ . Izraz prema (linearna) polarizacija pomeni, da konica vektorja električnega polja

$\vec{E}$  niha po premici. Prema komponenta  $\vec{1}_V E_V$  niha po koordinatni osi  $V$ , prema komponenta  $\vec{1}_H E_H$  pa niha po koordinatni osi  $H$ . Vsota obeh komponent ni nujno premo polarizirana, saj konica vektorja  $\vec{E}$  lahko opisuje tudi drugačno krivuljo v prostoru, v splošnem primeru elipso.

Komponenti  $E_V$  in  $E_H$  sta dva kazalca, torej dve kompleksni oziroma štiri realna števila. Komponenti  $E_V$  in  $E_H$  sicer natančno opisujeta sevanje antene, ki pa poleg lastnosti antene vsebuje tudi amplitudo  $|I_g|$  in fazo generatorja  $\phi_g$ . Slednja dva nista podatka antene niti ne opisujeta polarizacije valovanja!

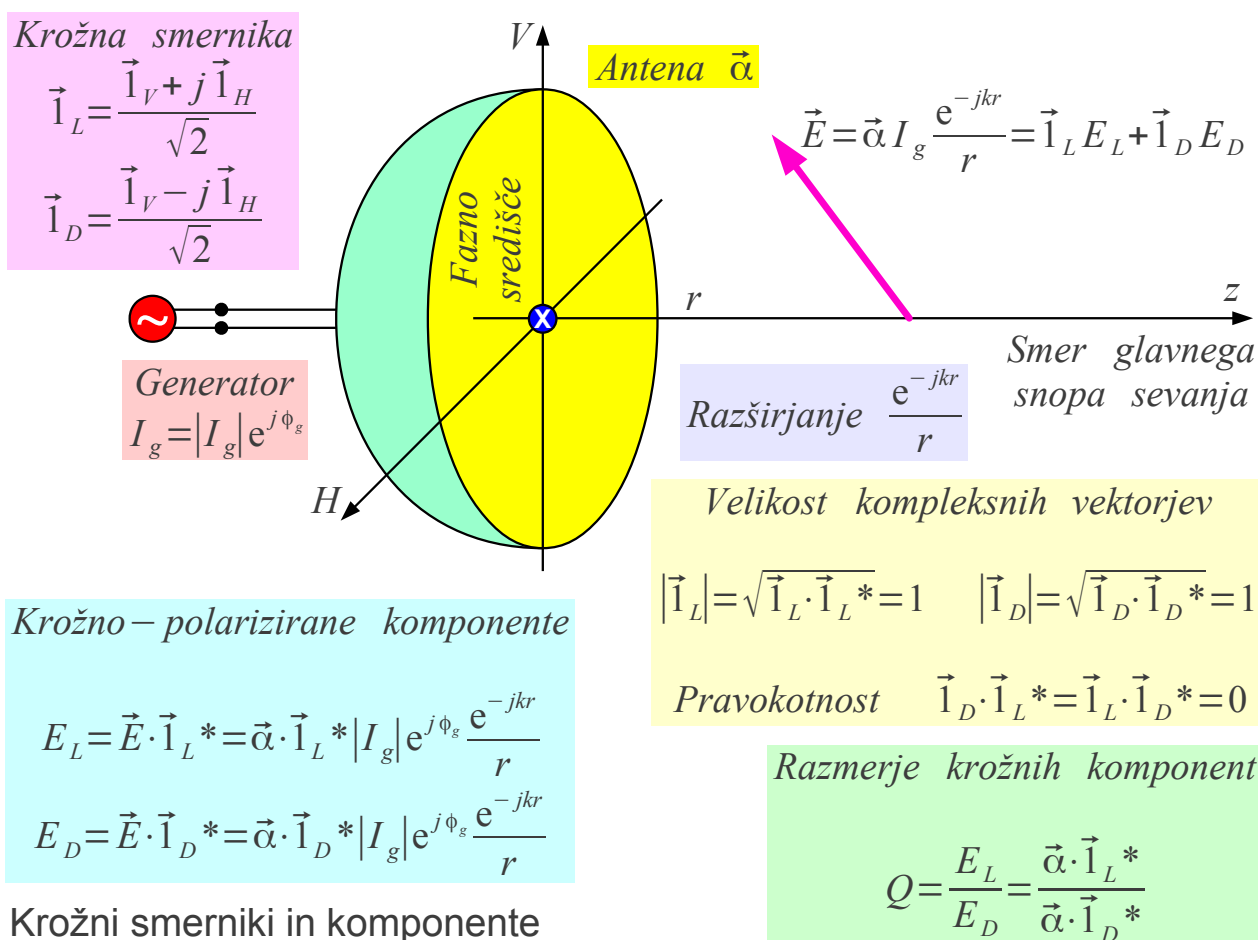
Polarizacijo antene lahko popolnoma opišemo z enim kompleksnim številom oziroma dvema realnima številoma. Na primer z razmerjem premih komponent  $E_V/E_H$ , ki je kompleksno število. V slednjem se lastnosti generatorja in razširjanje valovanja v praznem prostoru natančno krajšajo!

V istem koordinatnem sistemu  $(V, H, z)$  lahko izberemo še drugačne preme smernike. Primer sta poševna prema smernika  $\vec{1}_A = \vec{1}_{(45^\circ)}$  in  $\vec{1}_B = \vec{1}_{(135^\circ)}$ . Slednja sta med sabo pravokotna. Sevanje poljubne antene lahko razstavimo na premi komponenti  $E_A$  in  $E_B$  ter zapišemo polarizacijo antene z njunim kompleksnim razmerjem  $E_A/E_B$ .

Čeprav je teoretsko popolnoma upravičena, uporaba razmerja premih komponent  $E_V/E_H$  oziroma  $E_A/E_B$  v praksi ni priljubljena. Razlog je v težavni definiciji koordinatnega sistema  $(V, H, z)$ . Že pri nekoliko večji zemljepisni oddaljenosti se koordinatne osi  $(V, H, z)$  na površju Zemlje zasukajo. V veselju sploh ni uporabne definicije koordinatnih osi  $(V, H, z)$  razen v geostacionarni tirnici.

Brez definicije koordinatnega sistema  $(V, H, z)$  polarizacije ne moremo popolnoma opisati. Lahko pa z izbiro primernih smernikov in pripadajočih komponent vsaj delno opišemo polarizacijo antene brez natančne definicije  $(V, H, z)$ . V praksi je zelo priljubljena izbira krožnih smernikov  $\vec{1}_L$  in  $\vec{1}_D$ , ki omogočata zapis nekaterih lastnosti polarizacije antene brez natančne definicije koordinat  $(V, H, z)$ .

Krožna smernika  $\vec{1}_L = (\vec{1}_V + j\vec{1}_H)/\sqrt{2}$  in  $\vec{1}_D = (\vec{1}_V - j\vec{1}_H)/\sqrt{2}$  sta kompleksna vektorja. Konici vektorjev  $\vec{1}_L$  in  $\vec{1}_D$  krožita v ravnini  $VH$ . Pri računanju s krožnimi vektorji upoštevamo pravila kompleksnega računa:



Velikost kompleksnega vektorja dobimo s skalarnim produktom

$$|\vec{1}_D| = \sqrt{\vec{1}_D \cdot \vec{1}_D^*} = 1 \quad \text{vektorja in njegove konjugirano-kompleksne vrednosti.}$$

Pravokotnost kompleksnih vektorjev preverimo s skalarnim produktom

$$\vec{1}_D \cdot \vec{1}_L^* = 0 \quad \text{Komponento vektorja dobimo s skalarnim produktom}$$

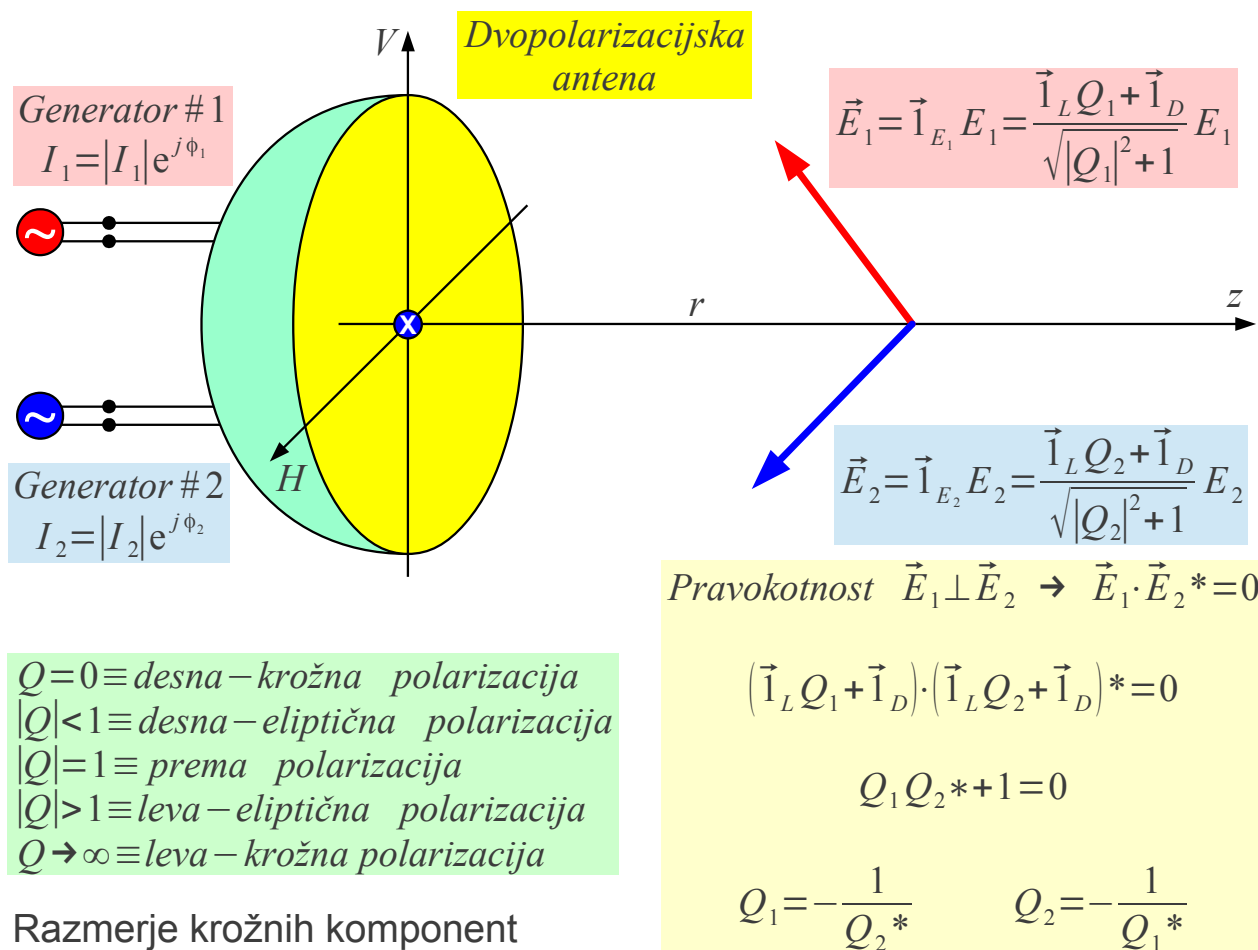
$$E_D = \vec{E} \cdot \vec{1}_D^* \quad \text{vektorja in konjugirano-kompleksne vrednosti smernika.}$$

Opisane definicije so povsem skladne z običajnim računom z realnimi vektorji in hkrati s kompleksnim računom s skalarnimi kazalci.

S pomočjo krožnih smernikov  $\vec{1}_L$  in  $\vec{1}_D$  lahko sevanje poljubne antene razstavimo na krožni komponenti  $E_L$  in  $E_D$ . Polarizacijo antene opisuje kompleksno razmerje krožnih komponent  $Q = E_L/E_D$  (angleško: circular-polarization ratio). Rožljanje s kompleksnim računom obrodi sad: amplituda razmerja krožnih komponent  $|Q| = |E_L/E_D|$  ni odvisna od izbire koordinatnega sistema  $(V, H, z)$  !

Amplituda razmerja krožnih komponent  $|Q|$  je sicer praktično uporabna veličina, ko želimo uporabljati krožno polarizacijo valovanja in

antene niso brezhibne. V grobem amplituda  $|Q|$  pomeni:



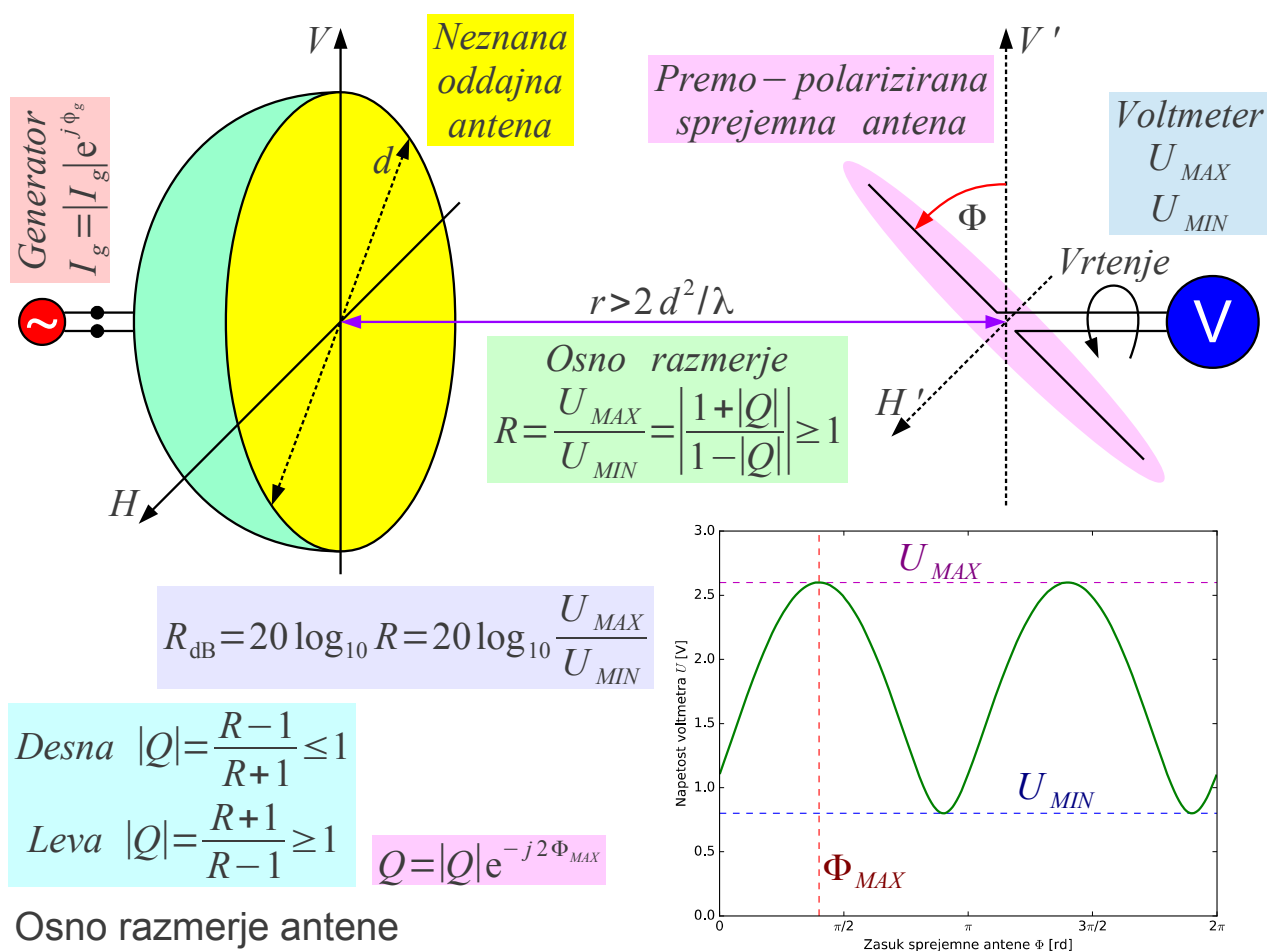
Z razmerjem krožnih komponent  $Q$  lahko zapišemo kompleksni smerni vektor poljubnega električnega polja  $\vec{E}$ . Iz pravokotnosti  $\vec{E}_1 \perp \vec{E}_2$  sledi pogoj za razmerji krožnih komponent  $Q_1$  in  $Q_2$  dvopolarizacijske antene, da se oddaji na pravokotnih polarizacijah med sabo ne motita. Dvopolarizacijski prenos omogoča dvakrat višjo zmogljivost radijske zveze v isti pasovni širini, torej dvakrat višjo spektralno učinkovitost. Nekoč je dvopolarizacijski prenos zahteval natančno nastavljanje satelitskih anten. Danes med sabo pravokotne vektorje poišče cenena elektronika v vsakem WiFiju oziroma mobilnem telefonu.

Smernik  $\vec{1}_D = (\vec{1}_V - j\vec{1}_H)/\sqrt{2}$  se v izhodišču koordinatnega sistema vrti v ravnini  $VH$  v desno in hkrati valovanje napreduje po pravilu desnega vijaka v smeri osi  $z$ . Elektrotehniki (definicija IEEE) takšno polarizacijo imenujemo desna-krožna polarizacija ali RHCP (angleško: Right-Hand Circular Polarization). Fiziki opazujejo valovanje v prostoru, kjer konica vektorja  $\vec{1}_D = (\vec{1}_V - j\vec{1}_H)/\sqrt{2}$  opisuje levo vijačnico. Zato fiziki takšno polarizacijo imenujejo leva-krožna polarizacija v nasprotju z definicijo IEEE.

Obratno se smernik  $\vec{1}_L = (\vec{1}_V + j\vec{1}_H)/\sqrt{2}$  v izhodišču koordinatnega sistema vrti v ravnini  $VH$  v levo in hkrati valovanje napreduje po pravilu levega vijaka v smeri osi  $z$ . Definicija IEEE takšno polarizacijo imenuje leva-krožna polarizacija ali LHCP (angleško: Left-Hand Circular Polarization). Fiziki opazujejo valovanje v prostoru, kjer vektor  $\vec{1}_L = (\vec{1}_V + j\vec{1}_H)/\sqrt{2}$  opisuje desno vijačnico. Zato fiziki takšno polarizacijo imenujejo desna-krožna polarizacija v nasprotju z definicijo elektrotehnikov.

Polarizacijo neznane antene merimo v radijski zvezi, kjer na drugi strani zveze uporabimo en ali več različnih referenčnih anten z znano polarizacijo. Običajno je najlažje izdelati premo-polarizirane antene. Na primer, v polvalovnem dipolu lahko teče tok samo v smeri žice, torej takšna antena seva premo-polarizirano električno polje v smeri žice.

Polarizacijo neznane antene lahko merimo s sukanjem znane premo-polarizirane antene na drugi strani zveze. Pri sukanju premo-polarizirane referenčne antene dobimo dva maksimuma in dva minimuma sprejema:



Oсно razmerje antene

Razmerje med maksimum in minimumom sprejete napetosti  $R = U_{MAX}/U_{MIN}$  imenujemo osno razmerje polarizacije (angleško: axial

ratio). Oso razmerje pogosto navajamo v logaritemskih enotah

$R_{dB} = 20 \log_{10} R$ . Izmerjeno oso razmerje je v razponu  $1 \leq R \leq \infty$  oziroma  $0 \text{ dB} \leq R_{dB} \leq \infty \text{ dB}$ . Kakovostna krožno-polarizirana antena ima oso razmerje pod  $R_{dB} < 1 \text{ dB}$ . Premo-polarizirana antena ima neskončno veliko oso razmerje  $R \rightarrow \infty$ , saj grejo minimumi proti nič!

Iz izmerjenega osnega razmerja  $R$  lahko izračunamo amplitudo razmerja krožnih komponent  $|Q|$ . Iz lege referenčne antene  $\Phi_{MAX}$ , kjer dobimo največji sprejem, lahko določimo še fazo razmerja krožnih komponent in dobimo  $Q = |Q|e^{-j2\Phi_{MAX}}$ . Česar z opisano meritvijo ne moremo določiti, je smer krožne oziroma eliptične polarizacije. Iz izmerjenega osnega razmerja  $R$  dobimo dve rešitvi za amplitudo  $|Q|$ , ki ustrezata levi in desni krožni oziroma eliptični polarizaciji!

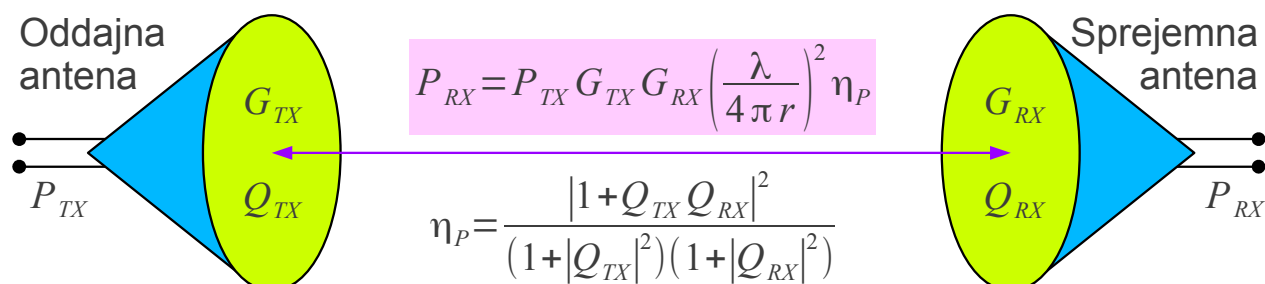
Za določitev smeri krožne polarizacije bi v opisani meritvi potrebovali kazalčni voltmeter, ki zna poleg amplitude sprejemne napetosti meriti tudi fazo. Kazalčna meritev zahteva neroden referenčni vod od oddajnika do voltmetra. Verjetno je bolj preprosto uporabiti dodatno referenčno anteno z znano levo oziroma desno krožno polarizacijo. Končno, za večino merjencev že v naprej v grobem poznamo smer polarizacije desna ali leva, zanimajo nas le podrobnosti in tu daje meritev osnega razmerja  $R$  natančen odgovor.

V obratni smeri bi oso razmerje  $R' = (1 + |Q|^2) / (1 - |Q|^2)$  lahko izračunali iz amplitude razmerja krožnih komponent. Leva krožna oziroma eliptična polarizacija pri tem daje negativen rezultat  $-\infty \leq R' \leq -1$ . Z negativnim  $R'$  bi lahko označili levo polarizacijo. Žal predznaka  $R'$  z opisano meritvijo ne moremo določiti, zato običajno uporabljamo samo pozitivno vrednost  $R = |R'| = |(1 + |Q|^2) / (1 - |Q|^2)| \geq 1$ .

S skalarnim produktom  $\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2^* = 0$  ugotovimo, da sta polji  $\vec{E}_1 \perp \vec{E}_2$  med sabo pravokotno polarizirani. Velikost skalarnega produkta  $|\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2^*| = |\vec{E}_1| |\vec{E}_2|$  pravi, da sta polji  $\vec{E}_1 \parallel \vec{E}_2$  enako polarizirani in se razlikujeta kvečjemu za skalarno (amplituda in faza) množilno konstanto. Ker v elektrotehniko vežemo polarizacijo na anteno, v radijski zvezi potrebujemo še povsem neodvisen (tretji!) pojem imenovan skladnost polarizacije (angleško: polarization match)!

V izračunu radijske zveze se pogosto sploh ne ukvarjamo s polarizacijo in privzamemo, da sta polarizaciji oddajne in sprejemne antene popolnoma skladni med sabo. Polarizaciji oddajne in sprejemne antene upoštevamo tako, da Friisovo enačbo radijske zveze v praznem prostoru dopolnimo s

faktorjem skladnosti polarizacije (angleško: polarization mismatch factor ali polarization efficiency)  $0 \leq \eta_p \leq 1$  :



Polarizacija TX		$Q_{TX}$	$R_{TX}$	Faktor skladnosti $\eta_p$ (polarizacija RX)					
				VP	HP	RHCP	LHCP	$P_{45^\circ}$	$P_{135^\circ}$
VP	$\vec{1}_V$	1	$\infty$	1	0	1/2	1/2	1/2	1/2
HP	$\vec{1}_H$	-1	$\infty$	0	1	1/2	1/2	1/2	1/2
RHCP	$\vec{1}_D = (\vec{1}_V - j\vec{1}_H)/\sqrt{2}$	0	1	1/2	1/2	1	0	1/2	1/2
LHCP	$\vec{1}_L = (\vec{1}_V + j\vec{1}_H)/\sqrt{2}$	$\infty$	1	1/2	1/2	0	1	1/2	1/2
$P_{45^\circ}$	$\vec{1}_A = (\vec{1}_V + \vec{1}_H)/\sqrt{2}$	-j	$\infty$	1/2	1/2	1/2	1/2	0	1
$P_{135^\circ}$	$\vec{1}_B = (\vec{1}_H - \vec{1}_V)/\sqrt{2}$	j	$\infty$	1/2	1/2	1/2	1/2	1	0

### Faktor skladnosti polarizacije

Faktor skladnosti polarizacije  $\eta_p = |\vec{1}_{ETX} \cdot \vec{1}_{ERX}^*|^2$  je načeloma kvadrat velikosti skalarnega produkta smernikov polarizacije oddajnika in sprejemnika. Pri zapisu smernikov z desno in levo komponento moramo paziti na njuno medsebojno fazo. Pri izračunu skladnosti se razliki faze krožnih komponent oddajnika in sprejemnika med sabo seštevata. Pri ugotavljanju vzporednosti oziroma pravokotnosti polarizacij se razliki faze krožnih komponent dveh oddajnikov med sabo odštevata. Izraz za faktor skladnosti  $\eta_p$  polarizacije v radijski zvezi zato vsebuje zmnožek  $Q_{TX} Q_{RX}$  (brez konjugirano-kompleksno oziroma zvezdice  $*$ ) za razliko od zmnožka  $Q_{TX1} Q_{TX2}^*$  pri primerjavi polarizacij dveh oddajnikov.

Kaj v resnici pomeni skladnost polarizacije, si je smiselno ogledati na nekaj preprostih zgledih. Povsem samoumevno pokončno polariziran oddajnik (VP) zahteva pokončno polariziran sprejemnik (VP). Vodoravno polariziran oddajnik (HP) zahteva vodoravno polariziran sprejemnik (HP). Z uporabo med sabo pravokotnih polarizacij lahko hkrati v istem prostoru in v istem frekvenčnem pasu vzpostavimo dve neodvisni radijski zvezi VP-VP in



HP-HP brez medsebojnih motenj.

Elektrotehnična definicija polarizacije veže koordinatni sistem na anteno. Desno-krožno polariziran oddajnik (RHCP) zahteva sprejemnik z enako desno-krožno polarizirano (RHCP) anteno. Levo-krožno polariziran oddajnik (LHCP) zahteva sprejemnik z enako levo-krožno polarizirano (LHCP) anteno. Pri uporabi krožne polarizacije sta anteni na obeh koncih zveze popolnoma enaki med sabo, kar fiziki težko razumejo. Povsem jasno uporaba obeh krožnih polarizacij RHCP in LHCP omogoča dve neodvisni radijski zvezi v istem prostoru in v istem frekvenčnem pasu.

Elektrotehniki težko razumejo, zakaj ne moremo uporabljati enakih anten pri poševni premi polarizaciji. Poševna prema polarizacija  $45^\circ$  oddajnika se na sprejemni strani preslika v poševno polarizacijo  $135^\circ$  zaradi obrnjene smeri snopa sprejemne antene! Fiziki koordinatnega sistema sicer ne obračajo, morajo pa vseeno uporabiti drugačno sprejemno anteno od oddajne antene! Povsem jasno tudi v primeru poševne preme polarizacije obstajata dve med sabo pravokotni inačici, ki omogočata dve neodvisni radijski zvezi v istem prostoru in v istem frekvenčnem pasu.

V tabeli šestih značilnih zgledov polarizacij oddajnika in sprejemnika imata vsak stolpec in vsaka vrstica natančno eno enico in eno ničlo. Za vsako polarizacijo oddajnika torej obstaja skladna polarizacija sprejemnika. Vsaki polarizaciji lahko najdemo pravokotni par, ki omogoča podvojitev zmogljivosti radijske zveze. Antena z univerzalno polarizacijo, ki bi zaznala poljubno polariziran oddajnik, ne obstaja.

Celo dvajseto stoletje so elektrotehniki in fiziki obravnavali polarizacijo valovanja na dva različna načina. Elektrotehniki so uporabljali antene z eno samo polarizacijo in imeli na razpolago hitre merilne pripomočke za ozkopasovne radijske signale. Fiziki so opazovali svetlobo poljubne polarizacije in izredno velike pasovne širine z več velikostnih razredov počasnejšimi merilnimi pripomočki.

V enaindvajsetem stoletju so se naloge elektrotehnikov in fizikov približale. Razvoj radijske tehnike zahteva dvopolarizacijske antene in širokopasovne signale, kar merilni pripomočki s težavo dohajajo. Komunikacije po svetlobnih vlaknih uporabljajo razmeroma ozkopasovne svetlobne signale in dvopolarizacijski prenos skupaj z oddajniki, sprejemniki in merilno tehniko, ki je sposobna te signale v celoti obdelati. Sodoben učbenik mora torej povzeti in med sabo povezati vse dosežke elektrotehnikov in fizikov.

Elektromagnetno sevanje koherentnega oddajnika popolnoma opišejo štiri realna števila: amplituda in faza generatorja ter kompleksno razmerje

komponent polarizacije antene. Pri svetlobnih frekvencah je težko meriti fazo, ostanejo torej tri realna števila, moč generatorja in kompleksna polarizacija antene. Dodatno celo pri koherentnih svetlobnih virih pogosto nastopata obe med sabo pravokotni polarizaciji, napajani z generatorjema, ki med sabo nista sinhronizirana niti nujno nimata enakih povprečnih moči.

Praktično uporaben zapis moči in polarizacije svetlobe je zasnoval matematik George Gabriel Stokes leta 1852 s štirimi parametri  $s_0$ ,  $s_1$ ,  $s_2$  in  $s_3$ . Vsi štirje parametri imajo merske enote moči  $P[\text{W}]$ , gostote moči  $\vec{S}[\text{W}/\text{m}^2]$  oziroma kvadrata amplitude električne poljske jakosti  $|\vec{E}|^2[\text{V}^2/\text{m}^2]$ . Parameter  $s_0$  predstavlja skupno moč prečnega valovanja, parameter  $s_1$  razliko moči med pokončno in vodoravno polarizacijo, parameter  $s_2$  razliko moči med poševnima polarizacijama  $45^\circ$  in  $135^\circ$  ter parameter  $s_3$  razliko moči med levo in desno krožno polarizacijo:

George Gabriel Stokes 1852

$$s_0 = P_V + P_H = P_A + P_B = P_L + P_D$$

$$s_1 = P_V - P_H = m s_0 \frac{2 \operatorname{Re}[Q]}{|Q|^2 + 1}$$

$$s_2 = P_A - P_B = m s_0 \frac{-2 \operatorname{Im}[Q]}{|Q|^2 + 1}$$

$$s_3 = P_L - P_D = m s_0 \frac{|Q|^2 - 1}{|Q|^2 + 1}$$

Hitri opazovalec

$$B_{\text{opazovalca}} \gg B_{\text{signala}}$$

$$s_0 = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2} \quad m = 1$$

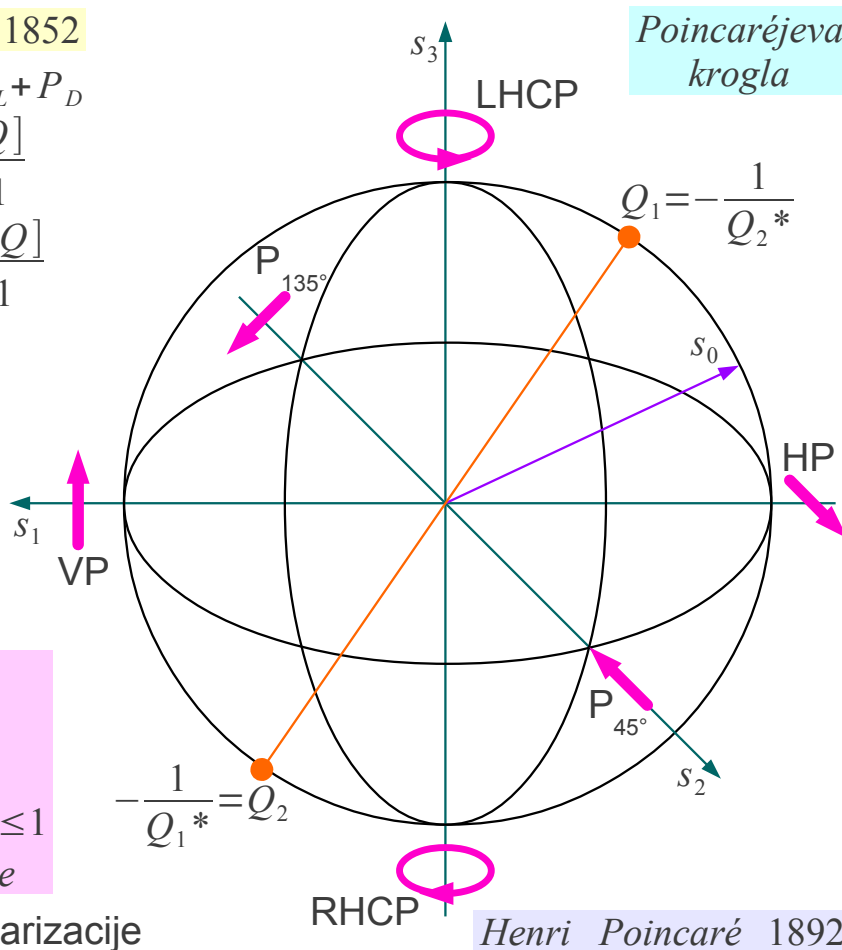
Počasni opazovalec

$$B_{\text{opazovalca}} \ll B_{\text{signala}}$$

$$m s_0 = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2} \quad 0 \leq m \leq 1$$

$m \equiv$  stopnja polarizacije

Stokesovi parametri polarizacije



Vse štiri Stokesove parametre določimo iz meritev moči. Primeren merilnik znamo izdelati za poljubno frekvenco od radijskih valov do svetlobe. Meritev moči izmeničnega signala v vsakem primeru vsebuje povprečenje.

Rezultat meritve moči je odvisen od časa povprečenja.

Hitri opazovalec  $B_{\text{opazovalca}} \gg B_{\text{signala}}$  lahko popolnoma izmeri polarizacijo ozkopasovnega signala. Polarizacijo in moč signala opiše s tremi med sabo neodvisnimi parametri  $s_1$ ,  $s_2$  in  $s_3$ . Preostali Stokesov parameter, skupno moč signala  $s_0 = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}$  izračuna iz ostalih treh.

Počasni opazovalec  $B_{\text{opazovalca}} \ll B_{\text{signala}}$  ne more slediti časovnemu razvoju polarizacije širokopasovnega signala. Polarizacijo in moč signala opiše s štirimi med sabo neodvisnimi parametri  $s_0$ ,  $s_1$ ,  $s_2$  in  $s_3$ . Zaradi dolgega časa povprečenja je skupna moč signala  $s_0 \geq \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}$  lahko večja od korena vsote kvadratov ostalih treh parametrov.

Počasni opazovalec oceni uspešnost svojega dela s stopnjo polarizacije  $m = (\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}) / s_0$ . Stopnja polarizacije se giblje v razponu  $0 \leq m \leq 1$ . Stopnja polarizacije  $m = 0$  pomeni nepolarizirano valovanje. Stopnja polarizacije  $m = 1$  pomeni popolnoma polarizirano valovanje.

Časovni razvoj polarizacije bele sončne svetlobe je tako hiter, da mu danes ne moremo slediti z nobenim merilnim pripomočkom. Povprečje razlike moči pokončne in vodoravne polarizacije zato izmerimo  $s_1 = 0$ , povprečje razlike moči obeh poševnih polarizacij izmerimo  $s_2 = 0$  in povprečje razlike obeh krožnih polarizacij izmerimo  $s_3 = 0$ . Za sodobno merilno tehniko bela sončna svetloba ostaja nepolarizirana  $m = 0$  !

Étienne-Louis Malus je s preprostimi merilnimi pripomočki ugotovil, da se odbojnost vodne gladine za pokončno polarizacijo (VP) razlikuje od odbojnosti za vodoravno polarizacijo (HP). Kljub nespremenjeni pasovni širini in počasnim merilnim pripomočkom ima od vodne gladine odbiti žarek sončne svetlobe stopnjo polarizacije  $m \neq 0$  različno od nič! Odboj sončne svetlobe na meji dveh različnih dielektrikov je lahko v izbranih pogojih (David Brewster 1815) celo popolnoma polariziran  $m = 1$ .

Matematik Henri Poincaré je leta 1892 našel nazoren prikaz Stokesovih parametrov znotraj krogle v središču kartezičnega koordinatnega sistema  $(s_1, s_2, s_3)$ . Popolnoma polarizirano valovanje  $m = 1$  opisuje točka na površini krogle polmera  $s_0$ . Delno polarizirano valovanje  $0 < m < 1$  opisujejo točke v notranjosti krogle. Nepolarizirano valovanje  $m = 0$  ustreza središču krogle. Nasprotiležni (antipodalni) točki na površini krogle opisujeta par med sabo pravokotnih polarizacij.

Med Stokesovimi parametri  $s_0$ ,  $s_1$ ,  $s_2$  in  $s_3$  in kompleksnim razmerjem krožnih komponent  $Q$  obstaja natančna povezava. Preprosto povedano, na Poincaréjevi krogli zemljepisna širina natančno določa amplitudo razmerja krožnih komponent  $|Q|$ , zemljepisna dolžina pa ustreza fazi razmerja krožnih komponent. Južni tečaj Poincaréjeve krogle ustreza desni krožni polarizaciji RHCP, severni tečaj pa levi krožni polarizaciji LHCP. vzdolž ekvatorja Poincaréjeve krogle je polarizacija prema, njena smer se suče s polovico zemljepisne dolžine.

Žal sta zaradi različnih definicij koordinatnih sistemov enoveljavno določena samo Stokesova parametra  $s_0$  in  $s_1$ . Stokesova parametra  $s_2$  in  $s_3$  menjata predznak, če koordinatni sistem vežemo na sprejemno anteno namesto na valovanje. Stokesov parameter  $s_3$  še dodatno menja predznak zaradi različnih definicij smeri krožne polarizacije elektrotehnikov in fizikov.

Pri sprejemu nepolariziranega valovanja  $m=0$  je faktor skladnosti polarizacije vedno enak  $\eta_p=1/2=50\%$  ne glede na polarizacijo sprejemne antene. Praktično pomemben primer v radijski tehniki je sprejem toplotnega šuma. Tudi druge motnje v radijski zvezi so najpogostejše nepolarizirane. Celotno moč nepolariziranega valovanja  $m=0$  bi lahko sprejeli samo z dvema med sabo pravokotno polariziranimi antenama, priključenima na dve neodvisni bremeni.

Zgodovinsko gledano so žarek svetlobe najprej opisovali s skupno močjo  $P$ , osnim razmerjem  $R$ , kotom zasuka  $\Phi_{MAX}$  in stopnjo polarizacije  $m$ . Stokes je zapis uredil s štirimi parametri  $s_0$ ,  $s_1$ ,  $s_2$  in  $s_3$  z enakimi merskimi enotami, ki se jih povrh da neposredno meriti na preprost način in nazorno prikazati na Poincaréjevi krogli.

Zapis polarizacije s kompleksnim razmerjem krožnih komponent  $Q$  je za antene sicer najbolj ugoden, ni pa kdovekako priljubljen, še posebno ne v angleški literaturi. Posledica neustreznega oziroma po nepotrebnem kompliciranega zapisa polarizacije anten so pogoste napake pri izračunu faktorja skladnosti polarizacije  $\eta_p$  v radijski zvezi!

Kompleksno razmerje  $Q$  se da dopolniti z močjo signala  $P$  oziroma s stopnjo polarizacije  $m$ . Celoten opis poljubnega valovanja ponovno daje štiri neodvisne realne parametre, na primer  $\text{Re}[Q]$ ,  $\text{Im}[Q]$ ,  $P$  in  $m$ . V primeru delno polariziranega valovanja  $m \neq 1$  sta  $R$  in  $\Phi_{MAX}$  vezana na celotno valovanje,  $Q$  pa samo na

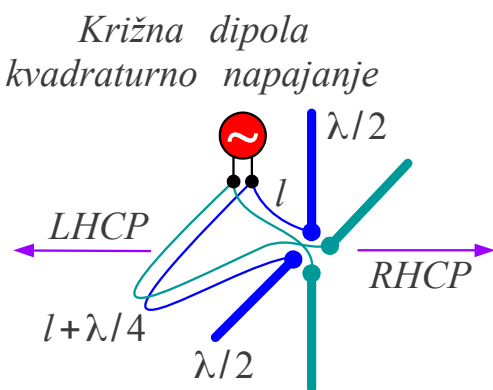
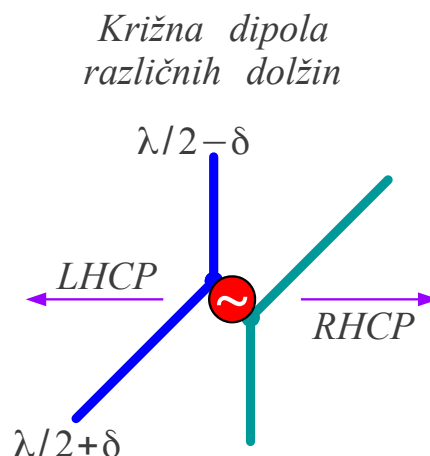
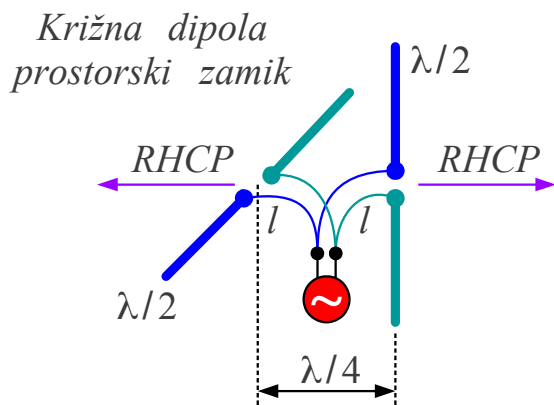
polarizirani del valovanja, kar zakomplicira račun!

Nepolarizirano svetlobo naravnih virov je enostavno pretvoriti v premo-polarizirano valovanje z izkoriščanjem različnih naravnih pojavov. Brewsterjev vpadni kot na mejo dveh dielektrikov daje premo-polariziran odboj. Dvolomni kristal razcepi nepolariziran vpadni žarek v dva med sabo pravokotno premo-polarizirana žarka. Sodobni polarizatorji vsebujejo umetne snovi z dolgimi molekulami, ki pravilno orientirane močno slabijo samo eno premo polarizacijo in prepuščajo njej pravokotno premo polarizacijo. Laserji večinoma sevajo premo-polarizirano svetlobo.

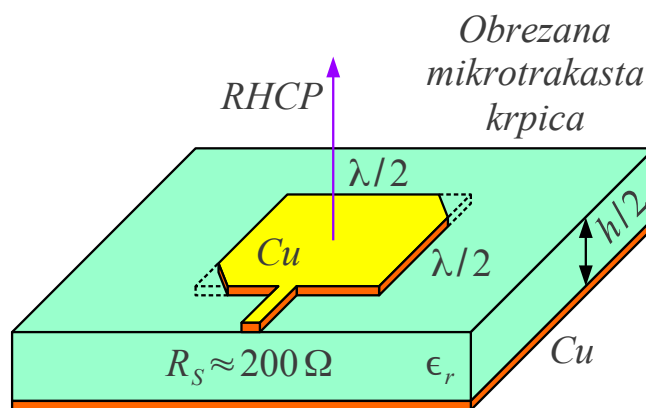
Radijske antene so v osnovi večinoma premo polarizirane. Smer sevanega električnega polja ustreza smeri toka v kovini antene. Natančnost preme polarizacije sevanja antene oziroma slabljenje neželjene pravokotne polarizacije (angleško: cross polarization) sta preprosto povezana z mehansko natančnostjo izdelave antene. Polarizacijo antene lahko pokvari sevanje napajalnih vodov ali senčenje mehanske konstrukcije.

Dosti težje je doseči kakovostno krožno polarizacijo tako za radijske valove kot za svetlobo. Celo antene, na primer različne vijačnice in spirale, ki naravno sevajo krožno polarizirane radijske valove, ne dajejo dobrega osnega razmerja  $R > 1$  zaradi načina delovanja same antene, torej mehanska natančnost izdelave nič ne pomaga. V praksi marsikdaj želimo krožno polarizacijo, na primer da se izognemo neznani legi sogovornika v vesolju oziroma izločimo nekatere neželjene pojave pri razširjanju valov.

Krožno polarizacijo dajeta dve premo-polarizirani anteni, na primer dva polvalovna dipola, postavljena pod pravim kotom in napajana v kvadraturi. Kvadratura pomeni enako močna vira in fazni zasuk četrte periode oziroma  $\pi/2$ . Fazni zasuk četrte periode je izvedljiv na različne načine: s prostorskim zamikom enega dipola, z napajalnimi vodi različnih dolžin oziroma z dipoloma različnih dolžin:



Krožno-polarizirani dipoli



Voda dolžin  $l$  in  $l + \lambda/4$  napajata dipola natančno v kvadraturi samo v primeru, ko sta impedanci dipolov brezhibno prilagojeni  $R_S = Z_K$  na karakteristično impedanco vodov. Razlika dolžin vodov  $\lambda/4$  pomeni invertiranje impedanc, kar pomeni zelo veliko napako faze in različno amplitudo vzbujaanja v primeru neprilagoditve  $R_S \neq Z_K$ . Povrhu ima polvalovni dipol tudi reaktivni del impedance  $Z_{dipola} = R_S + jX$  in slednji je močno odvisen od frekvence.

Jalovi del impedance  $jX$  polvalovnega dipola omogoča preprosto doseganje kvadrature. Nekoliko krajši dipol  $\lambda/2 - \delta$  ima kapacitivno impedanco  $X < 0$ . S pravilno izbiro skrajšanja  $\delta$  se da doseči prehitvanje faze za  $+\pi/4$ . Nekoliko daljši dipol  $\lambda/2 + \delta$  ima induktivno impedanco  $X > 0$ . S pravilno izbiro podaljšanja  $\delta$  se da doseči zaostajanje faze za  $+\pi/4$ . Kvadratura se torej da doseči s preprosto vzporedno vezavo dveh dipolov različnih dolžin.

Kvadratna mikrotrakasta krpica s stranico  $\lambda/2$  hkrati deluje kot antena za dve med sabo pravokotni premi polarizaciji. Pravilno obrezani nasprotni oglišči kvadratne krpice omogočata vzbujaanje med sabo pravokotnih rodov nihanja krpice v kvadraturi. Takšna krpica seva krožno-

polarizirano valovanje na povsem enaki osnovi kot dipola različnih dolžin.

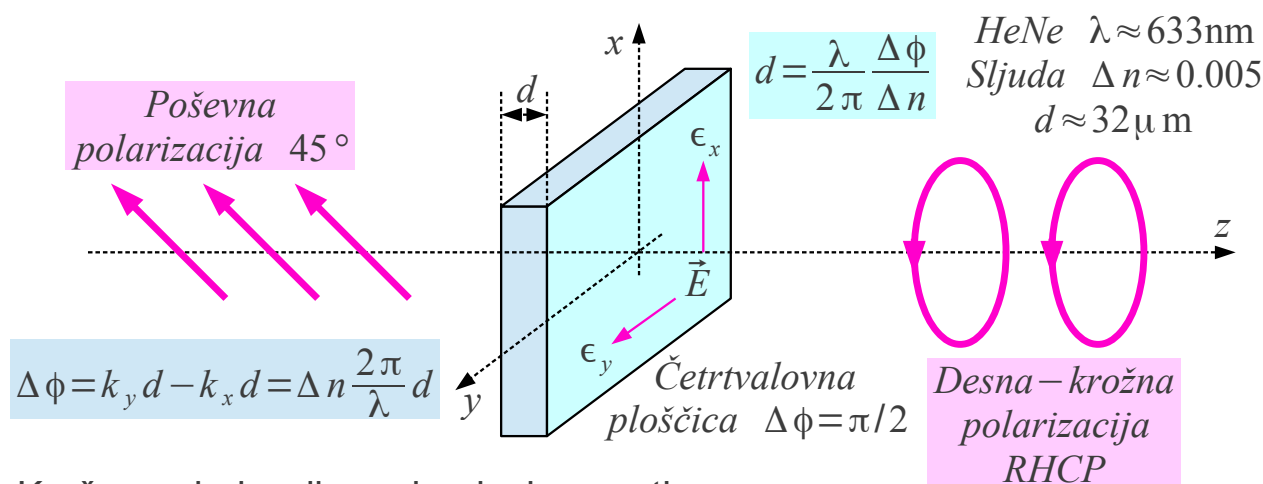
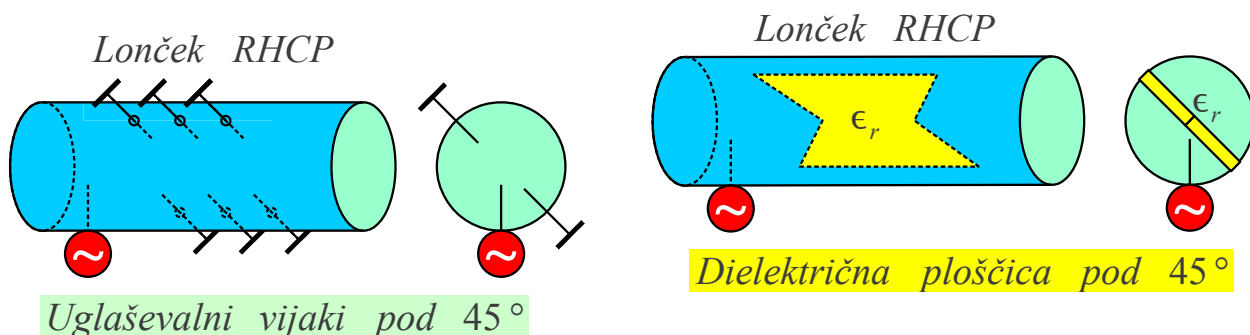
Zasuk koordinatnega sistema pri odboju elektromagnetnega valovanja od kovinske površine  $\Gamma \approx -1$  spremeni desno-krožno polarizacijo v levo-krožno polarizacijo in obratno. RHCP antena z enim zrcalom potrebuje LHCP žarilec za osvetlitev zrcala in obratno. Neželeni odboji so še dosti bolj moteči pri merjenju polarizacije antene kot pa pri merjenju smernega diagrama preproste pokončno ali pa vodoravno premo-polarizirane antene.

Posplošeno, odboji so pri krožni polarizaciji moteči vsepovsod, ne glede na to, kje do njih pride. Odbojnost  $\Gamma$  zaradi neprilagoditve napajalnega vezja v kvadraturi ima na krožno polarizacijo podoben učinek kot odbojnost  $\Gamma$  ovir v snopu sevanja antene. Končno so enačbe za kompleksno odbojnost  $\Gamma$  in realno valovitost  $\rho$  silno podobne enačbam za kompleksno razmerje krožnih komponent  $Q$  in realno osno razmerje  $R$ .

V radiu in v optiki lahko premo polarizacijo pretvorimo v krožno ali obratno z uporabo dvolomnosti. Izraz dvolomnost pomeni, da sta fazna konstanta  $\beta$  oziroma valovno število  $k$  odvisna od polarizacije valovanja. Dvolomnost najpogosteje dosežemo s primernim načrtovanjem valovoda oziroma z ureditvijo molekul v kristalu snovi.

Kovinski valovod brezhibnega krožnega prereza omogoča vodenje dveh inačic osnovnega rodu  $TE_{11}$  s popolnoma enakima faznima konstantama  $\beta$ . Če cev krožnega prereza sploščimo, če vgradimo nekaj ugaševalnih vijakov oziroma ploščico iz dielektrika, upočasnimo inačico  $TE_{11}$  z električnim poljem v pripadajoči smeri. Razlika faznih konstant  $\Delta\beta = \beta_{45^\circ} - \beta_{135^\circ}$  v odseku valovoda skrbno izbrane dolžine  $l$   $\Delta\beta = \pi/2$  pretvori linearno polarizacijo v krožno ali obratno.

Odboj valovanja na odprtini krožno-polariziranega lijaka (lončka) povsem jasno moti kakovost krožne polarizacije. Krožno polarizacijo lahko popravimo z natančno nastavitvijo ugaševalnih vijakov oziroma z lego in obliko ploščice iz dielektrika:



Krožna polarizacija preko dvolomnosti

Kristali vsebujejo natančno urejene molekule snovi. Dielektričnost kristalov se lahko razlikuje v dveh kartezičnih koordinatnih oseh oziroma celo v vseh treh kartezičnih koordinatnih oseh. V frekvenčnem področju svetlobe je zelo primerna dvolomna snov sljuda. Kristalna struktura sljude se naravno kolje v tanke lističe z optično gladko površino. Sljuda ima različno dielektričnost v vseh treh kristalnih oseh. Tanek listek sljude pri pravokotnem vpadu svetlobe izkazuje razliko v lomnem količniku  $\Delta n \approx 0.005$  za premo polarizirano svetlobo v smereh prečnih kristalnih osi.

Listek sljude primerne debeline lahko uporabimo kot četrťvalovno ploščico. Debelina slednje je skrbno izbrana, da vnaša fazni zasuk  $\Delta \phi = k_y d - k_x d = \pi/2$  četrť periode med obe pravokotni premi polarizaciji. Če na četrťvalovno ploščico vпада premo-polarizirana svetloba pod kotom  $45^\circ$  glede na kristalni osi  $x$  in  $y$  ploščice, dobimo po prehodu ploščice krožno polarizirano svetlobo.

Za rdeč žarek HeNe laserja  $\lambda \approx 633\text{nm}$  znaša debelina četrťvalovnega listka sljude približno  $d \approx 32\mu\text{m} \approx 50\lambda$ . Četrťvalovna ploščica sicer deluje tudi za radijske valove, ampak postane nerodno velika. Torej podobno kot so leče in prizme iz naravnih dielektrikov nerodno velike in pretežke za praktično uporabo v področju radijskih valov. Za radijske valove



kvečjemu izdelamo četrtvalovno ploščico iz umetnih dielektrikov, ki so že zaradi varčevanja s kovino močno dvolomni.

Nekatere antene že v osnovi sevajo oziroma sprejemajo krožno-polarizirano valovanje. Najbolj znan primer je vijačna antena z osnim sevanjem, opisana v poglavju o umetnih dielektrikih. Pri slednji kakovost krožne polarizacije kazi odboj od odprtega konca vijačnice. Osnovno razmerje opisane vijačne antene izboljšamo s postopnim krčenjem premera zadnjih dveh ovojev proti nič, da izničimo sevanje odboja na koncu antene.

Dvokraka spirala seva krožno polarizirano valovanje v zelo širokem razponu frekvenc. Generator priključimo med kraka spirale v središču. Tokova v obeh kraki spirale sta tik ob generatorju protifazna in se njuno sevanje izničuje. Valovanje napreduje po dvovodu iz obeh spiralnih krakov.

Z večanjem prepotovane poti se povečuje tudi razlika dolžin obeh spiralnih krakov, saj je zunanji krak vedno daljši od notranjega. Ko razlika poti doseže polovico valovne dolžine, postaneta tokova v obeh krakih sofazna in se njuno sevanje sešteva. Obseg aktivnega kolobarja znaša natančno eno valovno dolžino:

Arhimedova spirala  $\rho = \alpha \phi$

$$dl = \rho d\phi = \alpha \phi d\phi$$

$$l_1 = \int_0^{\phi} \alpha \phi d\phi = \frac{\alpha \phi^2}{2}$$

$$l_2 = \int_{\pi}^{\phi + \pi} \alpha \phi d\phi = \alpha \left[ \frac{(\phi + \pi)^2}{2} - \frac{\pi^2}{2} \right]$$

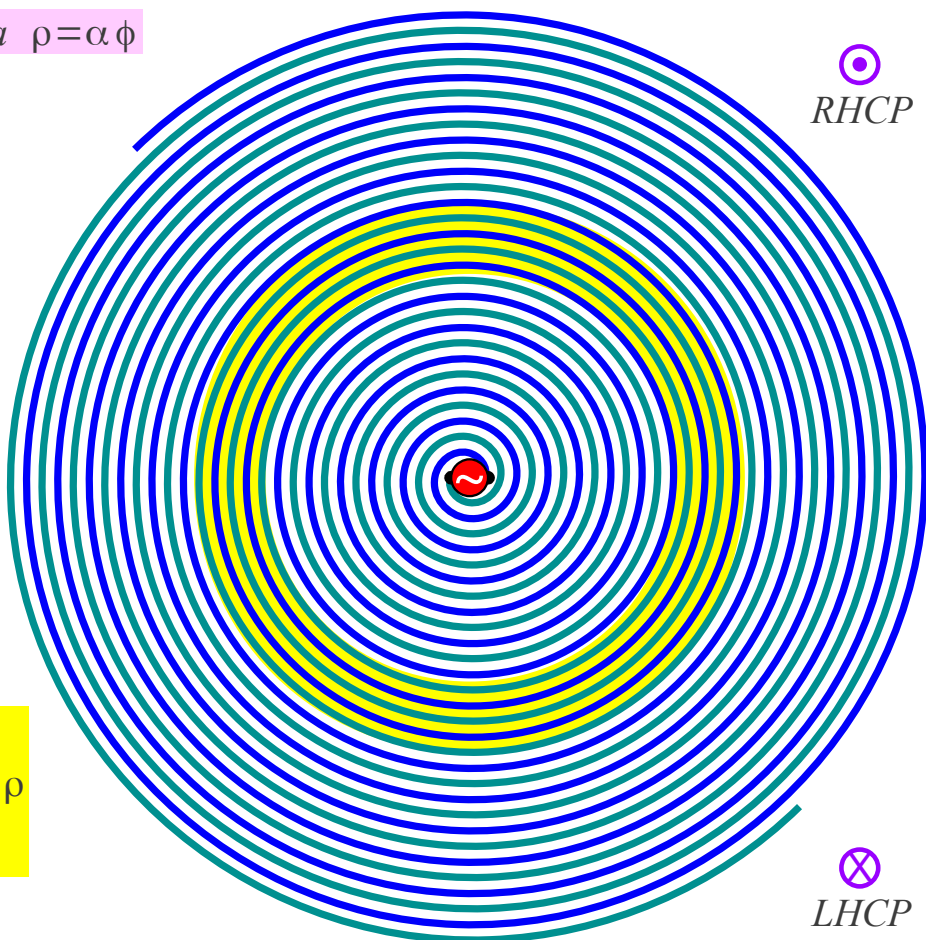
$$l_2 = \alpha \frac{\phi^2}{2} + \alpha \pi \phi$$

Aktivni kolobar

$$\frac{\lambda}{2} \approx l_2 - l_1 = \alpha \pi \phi = \pi \rho$$

$$\lambda \approx 2 \pi \rho$$

Dvokraka spirala



Aktivni kolobar dvokrake ravninske spirale na risbi seva dva krožno-polarizirana snopa, RHCP ven iz risbe in LHCP v risbo. Aktivni kolobar se vedno vzpostavi sam v širokem razponu frekvenc. Spodnjo frekvenčno mejo določa zunanji premer antene, gornjo frekvenčno mejo pa natančnost krakov spirale tik ob generatorju.

Sevanje dvokrake spirale motijo aktivni kolobarji višjih (lih) redov. Sevanje aktivnih kolobarjev višjih redov dušijo ohmske in dielektrične izgube dvovoda obeh krakov spirale. Dvokrako spiralo pogosto izjedkamo na tiskanem vezju iz laminata, ki ima za radijske frekvence zmerne izgube, na primer vitroplast  $\tan \delta \approx 0.02$ . Kakovostno krožno polarizacijo in širok frekvenčni pas  $f_{MAX} : f_{MIN} \geq 10 : 1$  dobimo za ceno slabega sevalnega izkoristka v velikostnem razredu  $\eta \approx 50\%$ .

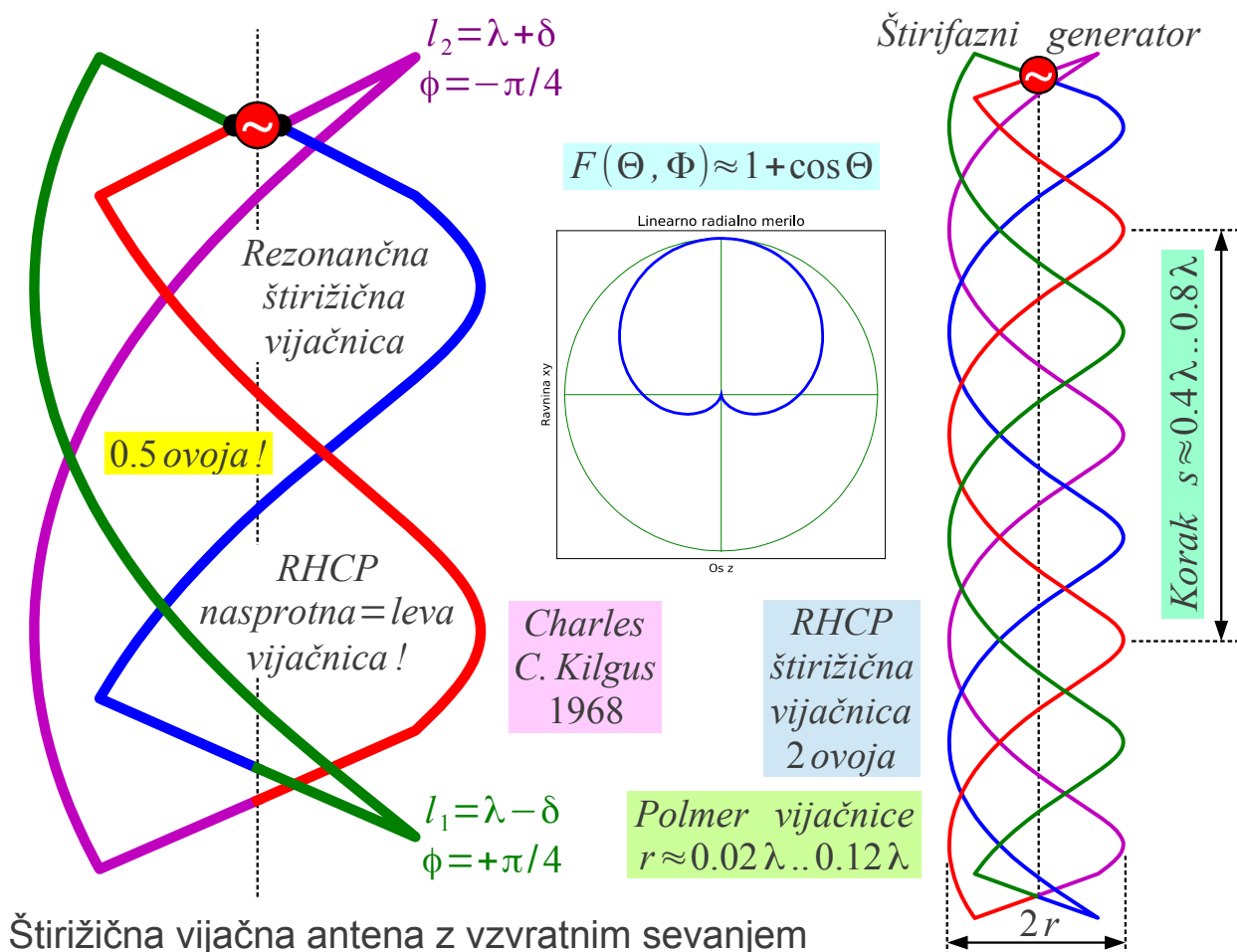
Sevalna upornost sebi-komplementarne (razmak med krakoma enak širini krakov) ravninske dvokrake spirale znaša  $R_S = Z_0/2 \approx 189 \Omega$  v praznem prostoru. Sevalno upornost znižujeta dielektrična podlaga  $\epsilon_r$  tiskanega vezja in kovinska plošča oziroma votlina za spiralo, s katero zadušimo enega od dveh snopov sevanja, na približno  $R_S \approx 100 \Omega$ . En sam glavni snop sevanja sicer omogoča dvokraka spirala na plašču stožca, ki pa je dosti bolj zahtevna za izdelavo od jedkanja ravninske dvokrake spirale na tiskanem vezju.

Preprosta križna dipola oziroma dvokraka spirala v ravnini  $xy$  sicer sevajo krožno-polarizirano valovanje v obeh smereh osi  $\pm z$ . Sevanje istih križnih dipolov oziroma dvokrake spirale je v ravnini  $xy$  popolnoma premo polarizirano! Letalstvo in vesoljska tehnika potrebuje antene, ki sevajo kakovostno krožno-polarizirano valovanje v zelo širokem prostorskem kotu, običajno vsaj v eni celi polobli. Povrh si v vesoljski tehniki ne moremo privoščiti anten s slabim sevalnim izkoristkom kot dvokraka spirala.

Odgovor na vse omenjene zahteve je štirikraka vijačna antena z vzvratnim sevanjem (angleško: quadrifilar backfire helix). Različne inačice štirižičnih vzvratnih vijačnic je razvil Charles C. Kilgus v letih 1968-1974. V primerjavi s Krausovo vijačnico z osnim sevanjem ima štirižična vzvratna vijačnica manjši polmer  $r \approx 0.07 \lambda$  in večji korak  $s \approx 0.6 \lambda$ . Povsem jasno štirje kraki vijačnice zahtevajo štirifazno vzbujanje. Štirižična vzvratna vijačnica mora biti navita v obratno smer od željene krožne polarizacije, torej leva vijačnica za RHCP!

Ravni odseki štirih žic ob generatorju sevajo v smeri osi, vijačni odseki pa sevajo bočno. Skupni smerni diagram krajše štirižične vijačne antene s kraki dolžine pol ovoja  $F(\Theta, \Phi) \approx 1 + \cos \Theta$  je podoben Huygensovemu

izvoru. Skupni smerni diagram daljše štirižične vijačne antene z  $N \geq 2$  ovojev se da oblikovati natančno v tisto, kar potrebujemo v vesoljski tehniki: največje sevanje v določen kot nad obzorjem in manjše sevanje v zenitu. V vseh primerih štirižična vzvratna vijačnica ohranja uporabno osno razmerje  $R_{dB} \approx 3dB \dots 6dB$  v celotni polobli:



Krajša štirižična vijačna antena s kraki dolžine pol ovoja omogoča preprosto napajanje v kvadraturi z izkoriščanjem resonančnih pojavov kot pri križnih dipolih. Skupno dolžino prvega para nasprotnih krakov izdelamo nekoliko krajšo od valovne dolžine  $l_1 \approx \lambda - \delta$  za prehitevanje faze  $+\pi/4$ . Skupno dolžino drugega para nasprotnih krakov izdelamo nekoliko daljšo od valovne dolžine  $l_2 \approx \lambda + \delta$  za zaostajanje faze  $-\pi/4$ . Oba para krakov različnih dolžin preprosto vežemo vzporedno za  $R_S \approx 50 \Omega$ .

Štirižična vijačna antena poljubne dolžine nima električnega polja v smeri osi na sami osi antene. V osi antene smemo torej namestiti nosilni kovinski drog oziroma električni napajalni vod.